

***Résolution matricielle
et nouvelles géométries
dans le logiciel MARTHE***

D. Thiery

R-37762

Synthèse

La version 4.3 du logiciel MARTHE est décrite dans le rapport R32210 de 1990. Depuis cette date, les pré et post-processeurs RAMAGE et GRAPHMAR ont été créés et ajoutés au mode d'emploi.

Parallèlement, de nouvelles méthodes de résolution des calculs ont été ajoutées :

- résolution matricielle par gradients conjugués (à partir de la version 4.4),

De nouvelles géométries ont également été introduites :

- maillages gigognes,
- modélisation en coupe verticale,
- modélisation à symétrie cylindrique.

Ce rapport, constitué de quatre chapitres totalement indépendants, décrit en détail ces nouvelles possibilités.

Table des matières

1. Résolution directe par gradients conjugués	7
1.1. Introduction.....	7
1.2. Performances	7
1.3. Domaine d'application.....	7
1.4. Principe de la méthode de résolution.....	7
1.5. Paramètres de contrôle.....	8
1.6. Valeurs conseillées (à titre indicatif) pour les paramètres	9
2. Maillages gigognes.....	11
2.1. Introduction.....	11
2.2. Domaine d'application.....	11
2.3. Syntaxe des maillages gigognes	12
2.4. Principe de la résolution des calculs	13
2.5. Cas particuliers	14
2.6. Affectations et modifications de données dans le logiciel marthe	15
2.7. Fichiers de données.....	16
2.8. Génération pratique d'un sous-maillage	16
2.9. Paramètres.....	16
2.10. Fichiers résultats	16

2.11. Exemples.....	17
3. Modélisation en coupe verticale	19
3.1. Introduction.....	19
3.2. Différents types de coupes	19
3.3. Coupe de type 1 : « en charge ».....	19
3.4. Coupe de type 2 avec zone non saturée (ZNS).....	20
3.5. Coupe de type 3 : avec densité (sans ZNS)	21
3.6. Coupe de type 4 : avec surface libre (sans ZNS, sans densité).....	22
3.7. Coupe type 5 : toits et substratums non parallèles et possibilités d'épentes	22
3.8. Tableau récapitulatif	23
4. Modélisation à symétrie cylindrique	25
4.1. Introduction.....	25
4.2. Conditions d'application.....	25
4.3. Principe	25
4.4. Mise en oeuvre pratique	28
4.5. Exemple d'application.....	28

Table des illustrations

Fig. 1 – Fichier perméabilité correspondant à un maillage principal et un sous-maillage inclus entre les lignes 9 et 10 et les colonnes 4 et 6.	17
Fig. 2 – Fichier perméabilité correspondant à un maillage principal et un sous-maillage débordant (situé au sud-ouest).	18
Fig. 3 – Exemple de fichiers pour une coupe à toits et substratums pas forcément parallèles (type 5).	24
Fig. 4 - Exemple 1 cylindrique : fichiers répertoires, substratum et pas de temps.	29
Fig. 5 – Exemple 1 cylindrique : fichier paramètre.	30
Fig. 6 – Exemple 1 cylindrique : profil de charge après 120 heures de pompage.	31
Fig. 7 – Exemple 2 cylindre 3D → 2D : fichier paramètre.	32
Fig. 8 – Exemple 2 cylindrique 3D → 2D : fichier substratum.	33
Fig. 9 – Exemple 2 : forage à pénétration partielle : isovaleurs de charges (et vitesses).	34
Schéma 1 - Exemples de maillages gigognes.	11
Schéma 2 - Détail.	12
Schéma 3 - Illustration des marges.	13
Schéma 4 - Calcul au sud de la maille col. 4, lig. 8.	14
Schéma 5 - Report dans la marge du sous-maillage.	14
Schéma 6 - Sous-maillage tangent ; il n’y a qu’un coin (n° 1) identique dans les 2 maillages.	15
Schéma 7 - Sous-maillage débordant. On remarque que, par construction, les parties hachurées sont supprimées par le modèle car elles ne font pas partie des marges mais elles généreraient une dissymétrie et des bilans déséquilibrés.	15

1. Résolution directe par gradients conjugués

1.1. INTRODUCTION

Une nouvelle méthode de résolution des calculs hydrodynamiques, c'est-à-dire du calcul des charges ou des pressions, a été mise au point et introduite dans le logiciel MARTHE à partir de la version 4.4. Cette méthode utilise le principe des Gradients Conjugués avec Préconditionnement. L'intérêt principal de cette méthode est sa rapidité et aussi sa capacité à traiter des systèmes aquifères présentant de très grands contrastes de transmissivité. Le module de résolution est adapté du sous-programme PCG2 développé par l'U.S.G.S et décrit par Hill (1990). La base de ce travail (écoulements en charge, sans débordements ni zone non saturée) a été réalisée dans le cadre d'un financement ANDRA.

1.2. PERFORMANCES

Les performances obtenues décrites par THIERY (1992) font apparaître, par rapport à la méthode itérative classique maille par maille, un gain de rapidité d'un facteur 15 à 20 pour les systèmes parfaitement linéaires (nappes captives à transmissivité constante en 2D ou 3D sans courts-circuits, ni zones équipotentiellles, ni maillages gigognes). Dans le cas général de nappes libres complexes avec dénoissements, débordements, etc., le gain de rapidité est de l'ordre d'un facteur 5. Cette méthode de calcul nécessite légèrement plus de capacité mémoire que la précédente. Le nombre maximal de maille accepté est donc légèrement réduit.

1.3. DOMAINE D'APPLICATION

La méthode de résolution s'adapte à tous les cas : régime permanent ou transitoire, écoulement à 2D ou 3D, nappes libres ou captives, mailles dénoyées ou à débordements, zones équipotentiellles, recharge, calcul en zone non saturée, calcul avec densité, calculs en pression, maillages gigognes, etc. Il arrive cependant exceptionnellement qu'elle soit prise en défaut dans le cas de systèmes 3D ou multicouche présentant de grandes zones de mailles dénoyées entre 2 couches. Les contrastes de transmissivité entre 2 mailles adjacentes de même dimension peuvent atteindre un facteur 5000 (au lieu de 100 environ pour la méthode itérative classique).

1.4. PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE RÉOLUTION

Le bilan dans chaque maille donne lieu à une équation entre la charge (ou la pression) du centre et les charges (ou pressions) des 6 mailles voisines. Au total, on obtient un système de N équations à N inconnues (les charges), N étant le nombre de mailles. Ce

système d'équations correspond à une matrice symétrique très «creuse » puisque les seuls éléments non nuls correspondent à la diagonale centrale et à 6 diagonales latérales. Cette matrice est préconditionnée puis résolue itérativement par la méthode des gradients conjugués (Press *et al.*, 1989).

Deux méthodes de préconditionnement sont disponibles :

- la méthode de Choleski qui s'est toujours révélée la plus rapide et la plus précise,
- la méthode Polynomiale... qui pourrait être adaptée dans le futur aux ordinateurs parallèles.

Dans le cas d'une nappe libre (ou bien avec des non linéarités comme des courts-circuits ou des zones équipotentielles), les coefficients de la matrice dépendent des charges qui ne sont pas encore connues. Pour une première évaluation des charges, on calcule les coefficients et on résout la matrice par NITRES itérations puis on réévalue NITCOE fois ces coefficients. Il y a donc un double processus itératif :

- NITCOE itérations dites « externes » où l'on calcule les coefficients.
- NITRES itérations dites « internes » pour inverser la matrice.

Il y a donc au total NITCOE x NITRES itérations mais l'expérience montre que ce sont les NITCOE fois où l'on calcule les coefficients qui sont coûteuses et qu'il faut minimiser. Pour chaque valeur des coefficients, la matrice est inversée correctement après NITRES itérations (si NITRES est suffisamment grand) et les charges ne varient pratiquement plus. Par contre, si les coefficients varient encore, après recalcul des coefficients, les charges qui en seront déduites varieront encore. La convergence est donc obtenue quand les charges ne varient plus dès la première itération INTERNE.

1.5. PARAMÈTRES DE CONTRÔLE

Les paramètres de contrôle sont les suivants :

NITCOE	Nombre maximal d'itérations par pas de calcul ou en régime permanent
TOL	Variation maximale de charge entre 2 itérations
RELAX	Coefficient de relaxation (< 1 pour ralentir les calculs en cas de forte non linéarité, > 1 pour les accélérer, ce qui est rare avec ce schéma de résolution)
IRESOL	Méthode de résolution : 1 = bandes de calcul. 2 = gradients conjugués avec pré-conditionnement Choleski ; c'est la méthode conseillée. 3 = gradient conjugué avec pré-conditionnement Polynomial. 4 = résolution itérative maille par maille. C'est la méthode de base, la plus lente, mais qui marche toujours.
NITRES	Nombre maximal d'itérations internes pour la résolution matricielle par gradients conjugués.

IALTER Type de résolution par Gradients Conjugués en 3D.
0 = toutes les couches à la fois. C'est le cas général.
1 = couche par couche. Cette méthode, plus lente, est automatiquement choisie en cas de courts-circuits. L'expérience a montré qu'il vaut mieux dans tous les cas laisser ce paramètre égal à zéro.

Les paramètres NITCOE, TOL et RELAX existaient déjà dans la méthode classique maille par maille.

1.6. VALEURS CONSEILLÉES (À TITRE INDICATIF) POUR LES PARAMÈTRES

Les valeurs conseillées des paramètres sont les suivantes :

NITCOE	1 à 5 en nappe captive totalement linéaire 15 à 50 en nappe libre ou non linéaire
TOL	un peu moins sévère qu'en résolution maille par maille. De l'ordre de 10^{-5} fois la charge moyenne (pour des raisons de précision numérique)
RELAX	1 (0,7 à 0,3 en cas d'oscillations importantes ; il convient alors d'augmenter NITCOE)
IRESOL	2 (c'est la valeur par défaut pour les versions > 5.2)
NITRES	10 en nappe libre ou non linéaire (c'est la valeur par défaut qui est prise si on met zéro)
IALTER	0

En pratique, pour les nappes captives totalement linéaires, il suffit de mettre NITCOE = 1, c'est-à-dire un seul calcul des coefficients, ce qui est économique, et NITRES suffisamment grand, cependant l'expérience montre que si NITRES dépasse environ 50, on risque une perte de précision et il est plus précis d'augmenter NITCOE à 3 ou 5 et de limiter NITRES à 50.

N.B. : 1. Le paramètre TOL (exprimé en unité de charges) a deux rôles distincts :

- a) arrêt de l'inversion matricielle quand la variation maximale de charge (en valeur absolue) est inférieure à TOL,
- b) arrêt définitif de la résolution quand la variation moyenne de charge (pour toutes les couches) est inférieure à TOL dès la première itération interne.

N.B. 2. On appelle schéma non linéaire un schéma qui comporte au moins une des caractéristiques suivantes :

- nappe libre (la transmissivité dépend de la charge),
- courts-circuits entre couches (par exemple : couche 2 connectée à la couche 4),

- présence de zones équipotentiellles,
- maillages gigognes,
- calculs en zone non saturée,
- calcul de la densité (qui modifie la pression).

Références

HILL Mary C. (1990) - Preconditionned Conjugate Gradient 2 PCG2. A computer program for solving ground-water flow equation. US Geological Survey. Denver (CO) 1990.

PRESS W.-H., FLANNERY B.-P., TEUKOLSKY S.-A., VETTERLING (1989) - Numerical recipes: The art of scientific computing (FORTRAN VERSION). Cambridge University Press.

THIERY D. (1992) - Amélioration des techniques de résolution du modèle hydrodynamique MARTHE. Rapport ANDRA 620 RP BRG 92-011 (R 34851 STO 4S/92).

2. Maillages gigognes

2.1. INTRODUCTION

Pour permettre une précision de calcul accrue dans certaines régions d'un modèle tout en conservant un nombre de mailles raisonnable, un système de maillages gigognes a été introduit dans le logiciel MARTHE à partir de la version 4.4. Ce système permet de définir jusqu'à 10 sous-maillages qui sont comme des « rustines » ou des « patchs » sur le maillage principal. Ces sous-maillages peuvent également déborder du maillage principal pour former une extension latérale du maillage. Réciproquement, on peut concevoir que le maillage principal permet de rassembler dans un modèle régional des modèles locaux détaillés.

La base de ce travail (écoulements saturés) a été réalisée dans le cadre d'un contrat ANDRA.

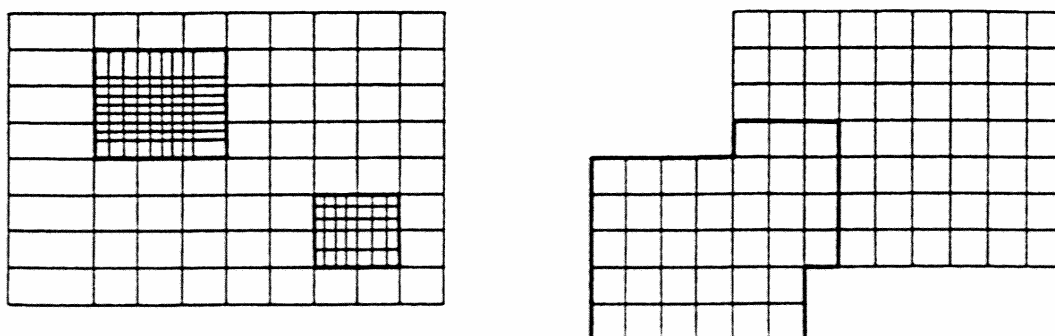


Schéma 1 – Exemples de maillages gigognes.

2.2. DOMAINE D'APPLICATION

Les maillages gigognes sont totalement opérationnels dans les cas suivants :

- * Maillages 2D, 3D ou multicouches, nappes libres ou captives, calculs en zone saturée ou non saturée, résolution itérative ou par gradients conjugués, transport uniquement par particules (au 1/10/93).

Ils ne sont pas (encore) opérationnels pour les calculs de transports de polluant et de densité par différences finies.

Le post-processeur GRAPHMAR sait reconnaître et gérer les maillages gigognes mais le module RAMAGE ne sait pas le faire.

2.3. SYNTAXE DES MAILLAGES GIGOGNES

1. Le nombre de sous-maillages est limité à 10.
2. L'emboîtement n'est qu'à un seul niveau, c'est-à-dire qu'un sous-maillage ne peut pas contenir un autre sous-maillage.
3. Les sous-maillages doivent être indépendants, c'est-à-dire ne doivent pas se recouvrir.
4. Le principe de subdivision est que les lignes et les colonnes du maillage principal sont subdivisées en un nombre entier de lignes et de colonnes. Par exemple, si la région formée par les colonnes 4 à 6 et les lignes 9 à 10 est remplacée par un sous-maillage, on pourra avoir le schéma suivant :

Colonnes du maillage	Nombre de colonnes du sous-maillage
n° 4	3
n° 5	5
n° 6	2

Lignes du maillage principal	Nombre de lignes du sous-maillage
9	2
10	3

Il faudra bien entendu vérifier que la somme des largeurs des 3 colonnes contenues dans la colonne n° 4 est égale à la largeur de la colonne n° 4, ou que la somme des hauteurs des 2 lignes contenues dans la ligne n° 9 est égale à la hauteur de la ligne n° 9.

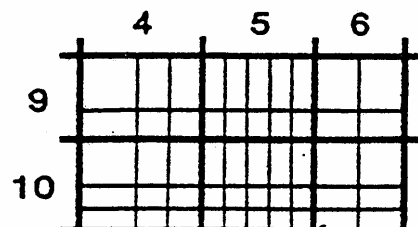
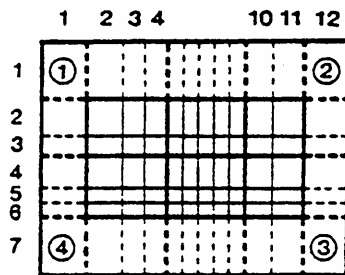
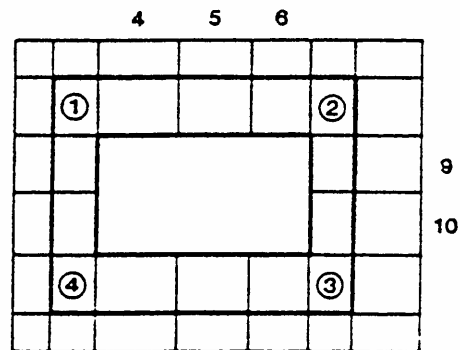


Schéma 2 – Détail.

5. Le nombre de sous-lignes (ou de sous-colonnes) contenues dans une ligne (ou une colonne) n'est pas limité. Ces sous-lignes (ou sous-colonnes) ne sont pas obligées d'être égales entre elles.
6. Chaque sous-maillage est bordé par des marges qui servent au transfert des données calculées dans le maillage principal.



Sous-maillage
(les marges sont en traits tiretés)



Maillage principal

Schéma 3 – Illustration des marges.

On remarque que, par construction, les 4 coins (notés 1 à 4) ont les mêmes dimensions dans le maillage principal et dans le sous-maillage.

7. Toutes les couches sont affectées par les mêmes sous-maillages.
8. Les marges appartiennent au maillage principal. On évitera que des singularités y apparaissent (dénoiements, liaisons étanches, mailles absentes, etc.). Si des éventuelles contraintes étaient introduites dans les mailles du sous-maillage correspondant aux marges : pompages, potentiels imposés, liaisons étanches, etc., elles ne seraient pas prises en compte.

2.4. PRINCIPE DE LA RÉOLUTION DES CALCULS

Les calculs hydrodynamiques sont réalisés de manière itérative, d'abord dans le maillage principal (avec les informations les plus récentes des sous-maillages) puis dans les sous-maillages (avec les informations les plus récentes du maillage principal). A chaque itération de calcul, on calcule les charges dans le maillage principal et dans tous les sous-maillages. Le couplage est donc total.

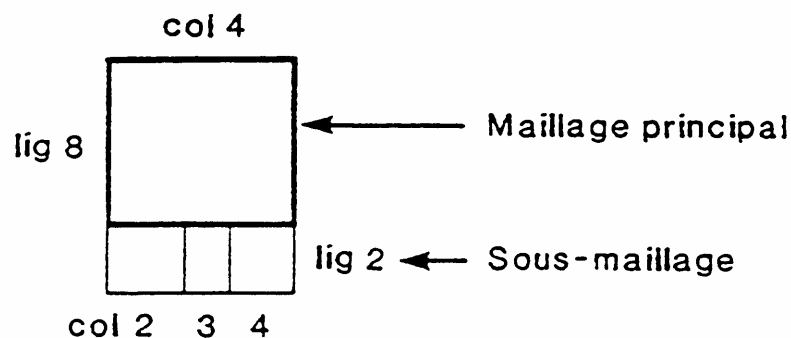


Schéma 4 – Calcul au sud de la maille col. 4, lig. 8.

Exemple : échanges au sud de la maille colonne 4, ligne 8 du maillage principal (voir schéma 4). Cette maille a 3 mailles (du sous-maillage) à son sud : les mailles ligne 2, colonnes 2, 3 et 4. Une fois calculée la charge H48 dans cette maille (col. 4, lig. 8), elle est reportée, identiquement, dans les 3 mailles ligne 1, colonnes 2, 3 et 4 de la marge du sous-maillage (schéma 5).

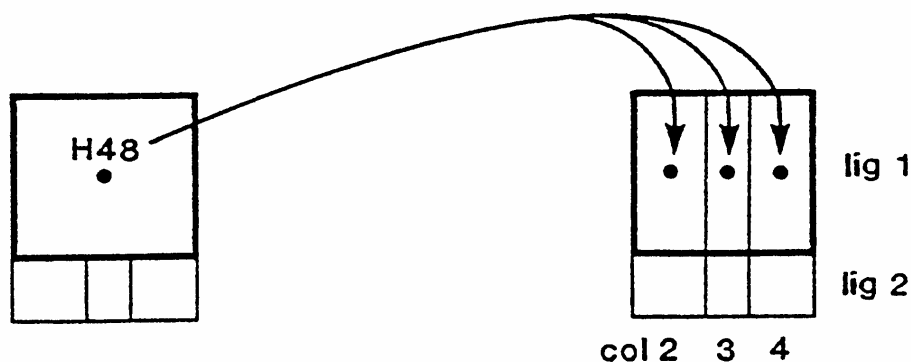


Schéma 5 – Report dans la marge du sous-maillage.

Les calculs dans le sous-maillage se font en sautant les marges (premières et dernières lignes, premières et dernières colonnes dans le cas général) qui sont fournies par le maillage principal.

2.5. CAS PARTICULIERS

Le principe des 4 coins égaux (principe 6) ne s'applique pas si le sous-maillage n'est pas complètement inclus dans le maillage principal ; en particulier le sous-maillage peut :

- a) être inclus mais tangent sur 1 ou 2 de ses bords : schéma 6,
- b) déborder du maillage principal.



Schéma 6 – Sous-maillage tangent ; il n’y a qu’un coin (n° 1) identique dans les 2 maillages.

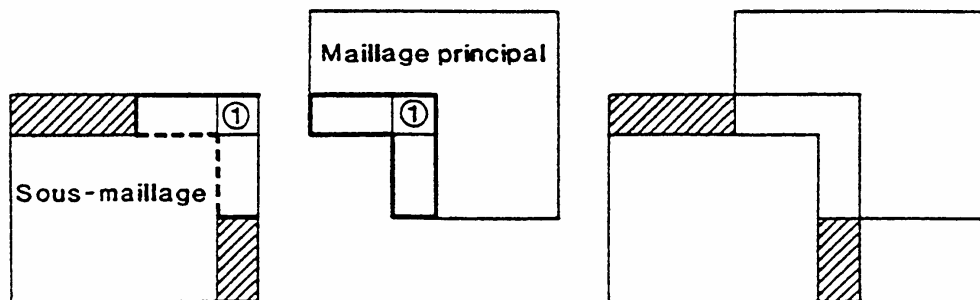


Schéma 7 – Sous-maillage débordant. On remarque que, par construction, les parties hachurées sont supprimées par le modèle car elles ne font pas partie des marges mais elles généreraient une dissymétrie et des bilans déséquilibrés.

2.6. AFFECTATIONS ET MODIFICATIONS DE DONNÉES DANS LE LOGICIEL MARTHE

- a) Modifications par « semis » : elles concernent tout le maillage donc avec tous les sous-maillages.
- b) Modifications par couche. On peut préciser le numéro du sous-maillage (0 = maillage principal, 99 = tous les sous-maillages, n = sous maillage n° n).
- c) Modifications par zones géométriques. On peut également préciser le numéro du sous-maillage (0 = maillage principal, 99 = tous les sous-maillages).
- d) Modifications par mailles on précise les numéros de ligne, colonne, couche et également de sous-maillage.
- e) Edition : elle concerne tout le maillage donc avec tous les sous-maillages.

N.B. : dans le logiciel MARTHE (et ses pré et post-processeurs), le numéro du sous-maillage est souvent appelé « numéro du détail » dans un souci de concision.

2.7. FICHIERS DE DONNÉES

Les fichiers de données sont constitués pour chaque type de donnée du semis du maillage principal suivi des semis des sous-maillages dans l'ordre. Dans le cas d'un système 3D ou multicouche, pour chaque type de donnée on placera les NC semis des NC couches du maillage principal puis les NC semis des NC couches du premier sous-maillage, etc.

2.8. GÉNÉRATION PRATIQUE D'UN SOUS-MAILLAGE

Pour générer un sous-maillage, le plus pratique est actuellement de procéder sous-maillage par sous-maillage.

On commence d'abord par générer un nouveau maillage avec le module RAMAGE ou OPERASEM. On veillera à respecter la syntaxe décrite par le paragraphe 2. Ce maillage sera un fichier « présence » (correspondant à la perméabilité). On lui affectera la valeur -1. On utilisera alors le module FUSIOMAR pour fabriquer les semis de tous les types de données (substratum, zones, perméabilité, etc.) à partir des semis du maillage principal. On ajoutera alors pour chaque type de donnée les données du sous-maillage au maillage principal (cette dernière opération sera réalisée automatiquement dans une version future du module FUSIOMAR). Pour faciliter le travail, on pourra réaliser un fichier commande du type :

COPY PRINCIP.SUB	+	SOUMAIL1.SUB	COMPLET.SUB
COPY PRINCIP.PER	+	SOUMAIL1.PER	COMPLET.PER
COPY PRINCIP.ZGE	+	SOUMAIL1.ZGE	COMPLET.ZGE

etc.

2.9. PARAMÈTRES

Il n'y a aucun paramètre à préciser dans le fichier paramètre du logiciel MARTHE. La reconnaissance de fichiers gigognes est automatique.

2.10. FICHIERS RÉSULTATS

Pour une visualisation graphique des résultats (par exemple des charges calculées), il est conseillé d'utiliser le module GRAPHMAR qui reconnaît automatiquement le maillage principal et ses sous-maillages et les dessine ensemble, en les séparant (volontairement) au niveau des marges. On peut également utiliser le module INGRID en dessinant le

maillage principal puis en demandant explicitement la superposition d'un autre semis : le premier sous-maillage, puis éventuellement des autres sous-maillages.

Dans tous les cas, il est conseillé, pour obtenir un dessin agréable, de dessiner un fichier sortie du type CHASIM.OUT puisque les marges des sous-maillages y sont occultées et non un fichier état final (du type FINAL.CHA) puisque les marges apparaissent avec des séries de valeurs identiques.

2.11. EXEMPLES

Deux exemples sont présentés figures 1 et 2 :

Figure 1 : 1 sous-maillage inclus, correspondant aux schémas 2 et 3.

Figure 2 : 1 sous-maillage débordant, correspondant au schéma 7.

PANNEAU	no	1 /	1 d'un	SEMIS de	12 LIGNES par	8 COL;	X0=	0 Y0=	0
5	15	22.5	30	42.5	55	64	71.5		
EXEMPLE	MAILLAGE	AVEC	UN	SOUS-MAILLAGE	INCLU (M.PRINCIP)			PERMH	1
5	5	5	5	5	5	5	5		115
5	5	5	5	5	5	5	5		105
5	5	5	5	5	5	5	5		95
5	5	5	5	5	5	5	5		85
5	5	5	5	5	5	5	5		75
5	5	5	5	5	5	5	5		65
5	5	5	5	5	5	5	5		55
1	1	1	1	1	1	1	1		45
1	1	1	1	1	1	1	1		35
1	1	1	1	1	1	1	1		25
1	1	1	1	1	1	1	1		15
1	1	1	1	1	1	1	1		5
PANNEAU	no	1 /	2 d'un	SEMIS de	7 LIGNES par	12 COL;	X0=	20 Y0=	10
22.5	27.5	31.5	34	36.5	39.5	42.5	45.5	48.5	52.5
EXEMPLE	MAILLAGE	AVEC	UN	SOUS-MAILLAGE	INCLU (SOUS-MAILL)			PERMH	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	45
1	1	1	1	2	2	2	2	3	36.5
1	1	1	1	2	2	2	2	3	31.5
1	1	1	1	3	3	3	3	2	27
1	1	1	1	3	3	3	3	2	23
1	1	1	1	3	3	3	3	2	21
1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
PANNEAU	no	2 /	2 d'un	SEMIS de	7 LIGNES par	12 COL;	X0=	20 Y0=	10
57.5	64								
EXEMPLE	MAILLAGE	AVEC	UN	SOUS-MAILLAGE	INCLU (SOUS-MAILL)			PERMH	1
1	1								45
3	1								36.5
3	1								31.5
2	1								27
2	1								23
2	1								21
1	1								15

Fig. 1 – Fichier perméabilité correspondant à un maillage principal et un sous-maillage inclus entre les lignes 9 et 10 et les colonnes 4 et 6.

PANNEAU no	1	/	1	d'un	SEMIS de	6 LIGNES par	6 COL; X0=	0	Y0=	0
5	15		25		35 45 55					
EXEMPLE	MAILLAGE	AVEC	UN	SOUS-MAILLAGE	DEBORDANT (M.PRINCIP)			PERMH	1	
1	1	1	2	3	1				55	
1	1	1	2	3	1				45	
1	1	1	2	3	1				35	
1	1	1	2	3	1				25	
1	1	1	2	3	1				15	
1	1	1	2	3	1				5	
PANNEAU no	1	/	1	d'un	SEMIS de	7 LIGNES par	7 COL; X0=	-30	Y0=	-20
-25	-15		-5		2.5 7.5 15 25					
EXEMPLE	MAILLAGE	AVEC	UN	SOUS-MAILLAGE	DEBORDANT (SOUS-MAILLAGE)			PERMH	1	
1	1	1	1	1	1	1			35	
1	1	1	1	1	1	1			25	
1	1	1	2	2	1	1			17.5	
1	1	1	2	2	1	1			12.5	
1	1	1	1	1	1	1			5	
1	1	1	1	1	1	1			-5	
1	1	1	1	1	1	1			-15	

Fig. 2 – Fichier perméabilité correspondant à un maillage principal et un sous-maillage débordant (situé au sud-ouest).

3. Modélisation en coupe verticale

3.1. INTRODUCTION

Il existe un grand nombre de situations où on souhaite modéliser un écoulement en coupe verticale (écoulement à travers un barrage, équilibre eau douce-eau salée le long d'une limite rectiligne, écoulement sous des fondations, etc.). Il est toujours possible de réaliser une telle modélisation avec le logiciel MARTHE en définissant une seule ligne de mailles par couche et un certain nombre de couches. Cependant, l'introduction et le contrôle des données sous forme de « semis » par couche n'est pas très agréable et l'utilisation de post-processeurs n'est pas aisée. Des possibilités spécifiques incluses dans le logiciel MARTHE permettent une introduction aisée des données sous forme de semis en coupe verticale. Il est alors possible d'utiliser efficacement les modules RAMAGE, GRAPHMAR, OPERASEM, INGRID (ou UNIGRID sur station de travail).

3.2. DIFFÉRENTS TYPES DE COUPES

Il existe 5 types de coupes verticales :

- type 1 : écoulement classique en charge sans influence de l'altitude, c'est-à-dire sans prise en compte de la zone non saturée (ZNS) ni de la densité du fluide ; à partir de la version 4.3,
- type 2 : écoulement en zone non saturée (ZNS) ; à partir de la version 5.1,
- type 3 : écoulement avec densité (sans ZNS) ; à partir de la version 5.1,
- type 4 : écoulement avec surface libre : sans ZNS ni densité ; à partir de la version 5.1,
- type 5 : écoulement multicouche avec toits et substratums non parallèles et épontes ; à partir de la version 4.4.

3.3. COUPE DE TYPE 1 : « EN CHARGE »

En fait, à partir du moment où un écoulement est en charge (et qu'il n'y a pas d'effet d'altitude par l'intermédiaire de la ZNS ou de la densité), l'orientation du maillage n'a aucune influence. Il suffit de construire un maillage monocouche (x, y) et de le considérer comme un maillage (x, z). On obtient donc immédiatement une coupe verticale, sans aucun paramètre spécifique. L'épaisseur de la couche (qui peut être variable d'une maille à l'autre) est donnée par la différence entre la « topographie » et le « substratum ». Il est même possible de réaliser cette coupe en symétrie cylindrique.

Pour les modifications par mailles ou la définition des mailles à historiques, le numéro de la couche est remplacé par le numéro de la ligne (puisque, vu du modèle, l'écoulement est monocouche horizontal).

Recharge : il ne faudra définir de zone de recharge que sur la ligne n° 1.

Il est possible d'avoir des maillages gigognes.

N.B. : Il faudra bien vérifier, a posteriori, que l'écoulement est partout en charge, c'est-à-dire que la charge est toujours supérieure au « toit » de la maille.

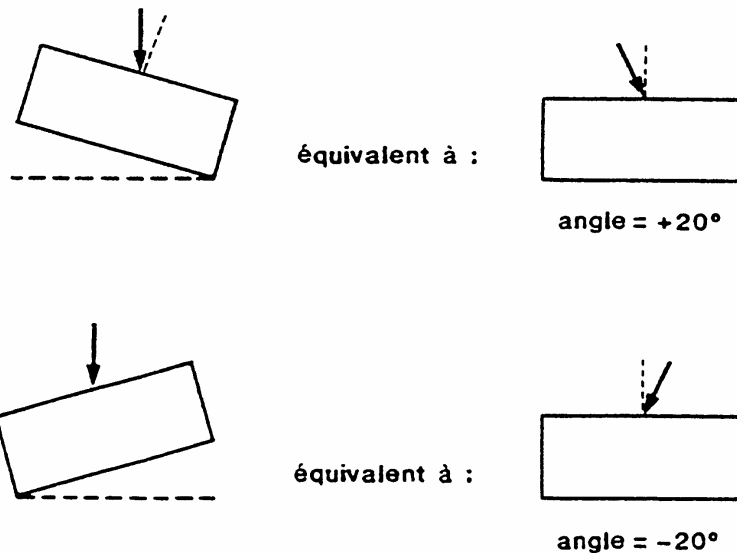
3.4. COUPE DE TYPE 2 AVEC ZONE NON SATURÉE (ZNS)

Pour les écoulements avec zone non saturée, on définit l'orientation de la gravité (c'est-à-dire de la pesanteur) au moyen de 3 paramètres :

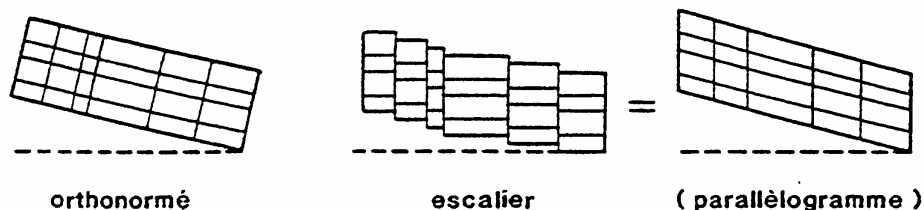
NPESAN : direction de la gravité (pesanteur)
0 = direction Oz : le bas (z négatif)
1 = direction Oy : vers les y négatifs
2 = direction Ox : vers la droite (x positif)

ANGPES : angle (correcteur) de la pesanteur par rapport à la verticale (définie par NPESAN). Cet angle est exprimé en degrés.

Ex.:



ESCAL := type de maillage incliné (actif seulement si l'angle ANGPES n'est pas nul)
0 = orthonormé
1 = escalier (parallélogramme)



Pour réaliser une coupe verticale, il suffit donc de définir un maillage monocouche horizontal (comme dans le type n° 1) et de définir la pesanteur sur la direction Oy (NPESAN = 1). Si on veut incliner la coupe, on pourra définir un angle ANGPEs et un type d'inclinaison. Dans le cas d'un schéma multicouche (3D), on n'a pas la possibilité de fixer NPESAN = 1 car il ne s'agirait plus d'une coupe.

Comme dans le type n° 1, l'épaisseur de la coupe est définie par la différence entre la cote de la «topographie » et celle du «substratum ». Pour les modifications par maille ou la définition des mailles à historiques, le numéro de la couche est remplacé par le numéro de la ligne (le numéro de la couche doit être fixé à 1) puisque, vu du modèle, il s'agit d'un maillage monocouche horizontal avec seulement la pesanteur dans une direction autre que Oz. Il est possible d'avoir des maillages gigognes.

3.5. COUPE DE TYPE 3 : AVEC DENSITÉ (SANS ZNS)

On définit un maillage monocouche horizontal et on utilise le paramètre NPESAN = 1, c'est-à-dire pesanteur sur Oy. C'est alors un code qui indique au logiciel MARTHE qu'il s'agit d'un écoulement en coupe verticale, c'est-à-dire en 3D mais avec une seule ligne par couche. Contrairement aux types 1 et 2, le calcul est ici réalisé en 3D par le modèle, avec prise en compte de désaturation ou de dénoiements. Seule l'introduction (et la restitution) des données se fait sous forme d'un «semis » unique correspondant à la coupe. Le modèle définit automatiquement les toits et substratums des mailles d'après les limites supérieures et inférieures des lignes. Ces toits et substratums sont donc horizontaux. L'épaisseur de la coupe, définie par le paramètre «épaisseur de la coupe », est défini dans le fichier paramètre.

Pour les modifications par maille ou la définition des mailles à historiques, on utilise le numéro de la couche et on fixe le numéro de la ligne à 1 puisque le calcul est réalisé réellement en 3D (seule l'introduction des données est en 2D). Pour la même raison, on ne peut définir de maillages gigognes (qui ne sont que dans le plan horizontal).

Il est possible de définir également un angle ANGPEs et un type d'inclinaison IESCAL. Ceci joue pour le calcul de l'altitude qui est utilisé dans la prise en compte de la densité.

3.6. COUPE DE TYPE 4 : AVEC SURFACE LIBRE (SANS ZNS, SANS DENSITÉ)

Ce type est exactement comme le type 3 (avec densité), les paramètres d'inclinaison ANGPEs et IESCAL sont utilisés pour le calcul de la cote du toit et du substratum (mais pas pour l'altitude qui n'est pas utilisée).

3.7. COUPE TYPE 5 : TOITS ET SUBSTRATUMS NON PARALLÈLES ET POSSIBILITÉS D'ÉPONTES

Il s'agit du cas le plus complexe (mais le plus général). Etant donné que les toits et substratums ne sont plus parallèles, ils ne peuvent être déduits des ordonnées d'un semis. On définit donc des semis anamorphosés. Les abscisses des colonnes sont inchangées, mais les ordonnées des lignes sont remplacées par l'opposé du numéro de couche, c'est-à-dire par les ordonnées suivantes -1, 2-, -3, ..., -NC (NC étant le nombre de couches). On n'oubliera pas que le point origine des ordonnées Y_0 de chaque semis sera égal à -NC - 0,5 (c'est-à-dire -12.5 s'il y a 12 couches par exemple). Les cotes des substratums (non parallèles) seront définies également par un semis (anamorphosé) de substratums. Les cotes topographiques, zones d'infiltration, zones d'irrigation et index de débordement seront également définis par des semis mais seulement la première ligne, correspondant à la surface, sera utilisée ; (les autres lignes pourront être codées à 9999). S'il y a des épontes, les perméabilités des épontes supérieures et les substratums des épontes supérieures seront également données dans des semis, et les données seront mises seulement dans les lignes correspondant à leur place ; c'est-à-dire que s'il y a par exemple 2 épontes : la première au-dessus de la couche 3 et la deuxième au-dessus de la couche 7, on mettra ces données respectivement dans les lignes 3 et 7 (les autres lignes pourront être codées à 9999).

L'épaisseur de la coupe est définie par le paramètre « épaisseur de la coupe », défini en unité de coordonnées et placé dans le fichier paramètres.

Pour définir la présence éventuelle et la position des épontes, il faudra obligatoirement définir NC couches dans le fichier paramètres au paragraphe « description des couches ». Il n'y a pas d'autres paramètres spécifiques à utiliser (pas besoin de NPESAN). Le modèle détecte sur le fichier paramètre qu'il y a NC couches ; il ne trouve qu'un seul semis mais avec NC lignes et chaque ligne ayant comme ordonnée -1, -2, ..., -NC. Il en déduit qu'il s'agit d'une coupe verticale (de type 5).

Pour les modifications par maille et pour la définition des mailles à historiques, on utilise le numéro de la couche (et on fixe le numéro de la ligne à 1) puisque le calcul est réalisé réellement en 3D (seule l'introduction des semis de données est sous forme 2D).

N.B. : il n'est pas possible d'avoir de maillages gigognes puisque les maillages gigognes ne sont possibles que dans le plan horizontal.

Un exemple de fichiers correspondant au type 5 est donné dans la figure 3.

3.8. TABLEAU RÉCAPITULATIF

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
Nombre de couches à indiquer dans le fichier paramètres	1	1	1	1	NC
NPESAN (direction de la pesanteur)	0	1	1	1	0
ANGPES (angle de la pesanteur avec la verticale)	Non	Oui	Oui	Oui	Non
Maillages gigognes	Oui	Oui	Non	Non	Non
Epaisseur de la coupe	Topogr. -subs	Topogr. -subs	Paramètre dans fichier paramètre	Paramètre dans fichier paramètre	Paramètre dans fichier paramètre
Historiques et modification par mailles : Définition de la couche par :	Numéro Ligne	Numéro Ligne	Numéro Couche	Numéro Couche	Numéro Couche

Fichier : Topographie

PANNEAU no	1	/	1	d'un	SEMIS	de	4	LIGNES	par	10	COL;	X0=	0.5	Y0=	-4.5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
TOPOGRAPHIE															TOPOG	1
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25						-1	
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999						-2	
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999						-3	
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999						-4	

Fichier : Substratum

PANNEAU no	1	/	1	d'un	SEMIS	de	4	LIGNES	par	10	COL;	X0=	0.5	Y0=	-4.5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
SUBSTRATUM															SUBST	1
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20						-1	
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15						-2	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10						-3	
-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5						-4	

Fichier : Substratum Eponte superieure

PANNEAU no	1	/	1	d'un	SEMIS	de	4	LIGNES	par	10	COL;	X0=	0.5	Y0=	-4.5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
SUBSTRATUM EPONTE SUPERIEURE															HTOIT	1
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999						-1	
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						-2	
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999						-3	
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999						-4	

Fichier : Zones de Recharge

PANNEAU no	1	/	1	d'un	SEMIS	de	4	LIGNES	par	10	COL;	X0=	0.5	Y0=	-4.5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
ZONES DE RECHARGE															ZONEP	1
0	0	1	1	1	2	2	2	3	0						-1	
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999						-2	
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999						-3	
9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999						-4	

Fig. 3 – Exemple de fichiers pour une coupe à toits et substratums pas forcément parallèles (type 5).

4. Modélisation à symétrie cylindrique

4.1. INTRODUCTION

Les écoulements au voisinage d'un forage (pompage, injection, slug test, essai PANDA) présentent souvent une symétrie cylindrique (ou « axisymétrique »). La modélisation de tels écoulements peut se faire classiquement en différences finies en deux dimensions avec des mailles rectangulaires ou en trois dimensions avec des mailles parallélépipédiques.

De tels maillages ne sont pas particulièrement adaptés à une symétrie cylindrique (« quadrature du cercle »). Il est possible en utilisant la méthode décrite ci-dessous d'obtenir une précision nettement améliorée tout en réduisant considérablement le nombre de mailles : un écoulement en 3D devient en 2D et un écoulement en 2D devient en 1D. Cette méthode ne s'applique qu'à des écoulements en charge (totalement saturés) ou à des écoulements en zone non saturée. Elle ne s'applique pas à des écoulements avec « nappe à surface libre ».

4.2. CONDITIONS D'APPLICATION

Cette méthode s'applique en régime permanent ou transitoire pour des écoulements en charge (charge au dessus du toit). Elle s'applique également aux écoulements avec prise en compte de la zone non saturée. Il est possible de l'utiliser également dans les écoulements avec prise en compte de la densité.

4.3. PRINCIPE

Maillage

Soit le maillage suivant.

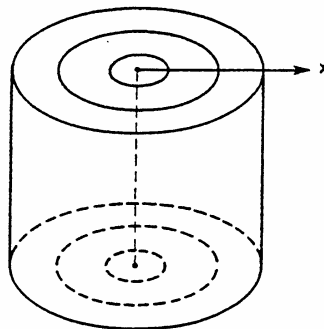


Schéma 8

Il suffit de ne modéliser qu'un secteur d'angle α .

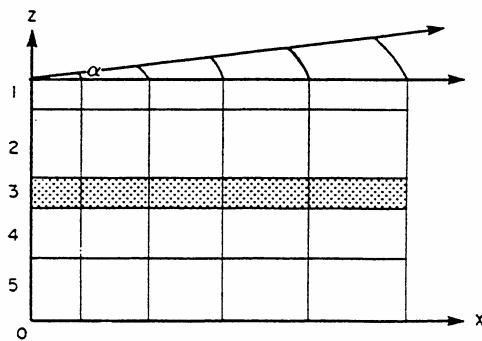


Schéma 9

On bascule le maillage sur le plan horizontal.

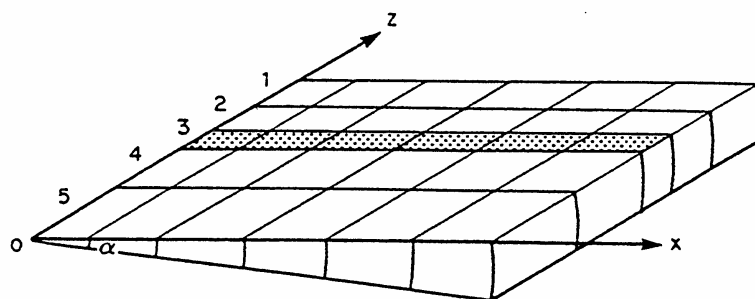


Schéma 10

Soit un plan avec oz qui devient oy.

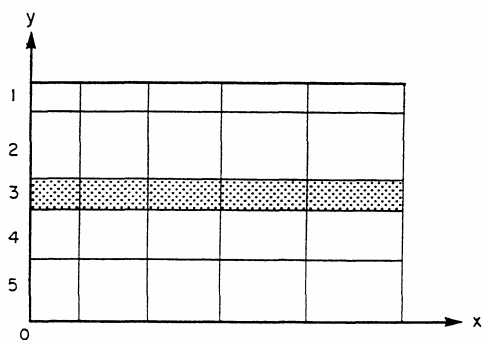


Schéma 11

On aboutit ainsi à un maillage rectangulaire à 2D, mais avec des épaisseurs proportionnelles à l'abscisse x .

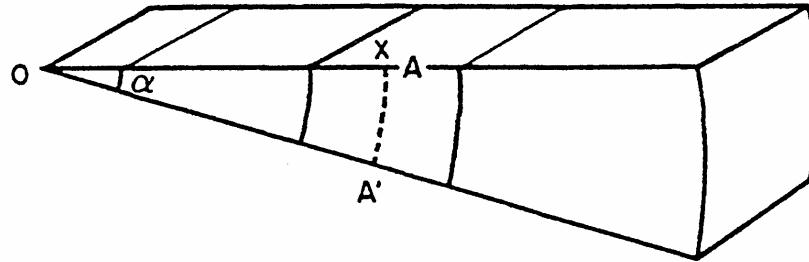


Schéma 12

Épaisseur $E = AA' = x \cdot \alpha$ avec α = angle en radians. Par discrétisation on obtient le schéma équivalent.

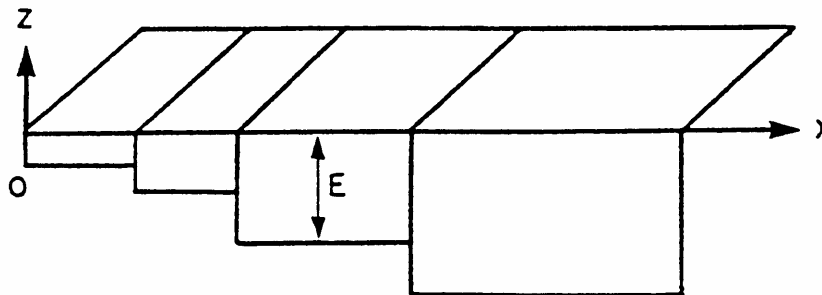


Schéma 13

Pour la mise en œuvre, le plus simple est de considérer un angle $\alpha = 1$ radian (57,3 degrés). Il suffit alors de donner à chaque maille une épaisseur $E = x$.

Débits

Étant donné que la circonférence totale représente 360° c'est-à-dire 2π radians, le secteur représente $1/2\pi$ du maillage total.

S'il y a des débits Q prélevés ou injectés, on introduira dans le modèle le débit QM correspondant défini par :

$$QM = \frac{1}{2\pi} \cdot Q = 0.15915 \cdot Q$$

Régime transitoire

Si on est en régime transitoire, il faudra obligatoirement utiliser le coefficient d'emmagasinement spécifique S_s (exprimé en $[L^{-1}]$) au lieu du « coefficient d'emmagasinement S des hydrogéologues ».

4.4. MISE EN OEUVRE PRATIQUE

Il n'y a aucun paramètre particulier à utiliser.

- Toit et substratum : pour donner une épaisseur égale à l'abscisse x , le plus simple est de définir une cote topographique (toit) égale à zéro partout et de définir un substratum égal à $-x$. On veillera alors à avoir des charges toujours > 0 de façon à être toujours en charge.

Dans le cas contraire, il suffirait de faire un changement de repère :

par exemple : référence substratum = - 100.

- Épaisseur moyenne de la couche : il n'y a pas d'épaisseur moyenne bien définie. Il suffit par exemple de donner l'épaisseur correspondant à la colonne centrale.
- Rapport Épaisseur minimale de dénoyage : il faut donner une valeur très faible (par exemple 10^{-4} ou 10^{-5}) de telle sorte que ce nombre, multiplié par l'épaisseur moyenne soit très inférieur à l'épaisseur de la première colonne. Pour les versions Marthe 5.2 et suivante il n'y a pas besoin de s'en préoccuper.
- En transitoire préciser : coefficient d'emmagasinement spécifique.
- Pour un calcul en zone non saturée, versions 5.2 et suivantes, il faudra indiquer que la gravité est dans la direction Oy.

4.5. EXEMPLE D'APPLICATION

Exemple 1 : Monocouche

Nappe de 50 m d'épaisseur, perméabilité $K = 10^{-4}$ m/s, coefficient d'emmagasinement $S = 5 \cdot 10^{-2}$, pompage au centre de 2 000 m³/h.

Solution

On se ramène à un maillage à 1 dimension, donc 1 seule ligne de mailles de 50 m de hauteur.

$$S_s = 5.10^{-2}/50 \text{ m} = 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

$$Q_M = 2000 \times 0.15915 = 318.31 \text{ m}^3/\text{h}$$

Le maillage est formé d'une ligne de 17 mailles de 50 mètres de largeur. Les figures 4 et 5 présentent le fichier répertoire, le fichier substratum, le fichier pas de temps, le fichier paramètres. La figure 6 montre le profil de charges calculées après 120 h de pompage (en traits interrompus) comparé à la solution de Theis (en trait continu). Il apparaît que l'ajustement est extrêmement bon (excepté pour la première maille puisque le pompage n'est pas situé exactement au même endroit).

Fichier répertoire

```

EXEMPLE MAILLAGE CYLINDRIQUE 2D --> 1D (POMPAGE)
MONORADI.PER                                =Fichier: PERMEABILITES
=0                                           =Fichier: DEBITS
=50                                          =Fichier: CHARGES
=10                                          =Fichier: EMMAGASINEMENT CAPTIF
=5                                           =Fichier: EMMAGASINEMENT LIBRE
=0                                           =Fichier: ZONES DE GEOMETRIE
MONORADI.SUB                                =Fichier: COTES DU SUBSTRATUM
=0                                           =Fichier: ZONES EQUIPOTENTIELLES
=0                                           =Fichier: COTES TOPOGRAPHIQUES
=0                                           =Fichier: ZONES D'INFILTRATION
=0                                           =Fichier: ZONES D'EXCES D'IRRIGATION
=0                                           =Fichier: INDEX DE DEBOREMENT
=0                                           =Fichier: SUBSTRATUM EPONTE SUPER.
                                           =Fichier: PERMEABILITE EPONTE SUPER.
MONORADI.MAR                                =Fichier: PARAMETRES GENERAUX
MONORADI.PAS                                =Fichier: DESCRIPTION PAS DE TEMPS
                                           =Fichier: LIAISONS ETANCHES
                                           =Fichier: ANISTROPIE HORIZONTALE KX/KY
                                           =Fichier: ANISTROPIE VERTICALE KV/KH

```

Fichier substratum

```

Panneau no 1 / 2 d'un SEMIS de 1 LIGNES par 17 COL; X0= 0 Y0= 0
25 75 125 175 225 275 325 375 425 475
MAILLAGE RADIAL
-25 -75 -125 -175 -225 -275 -325 -375 -425 -475 HSUBS 1
Panneau no 2 / 2 d'un SEMIS de 1 LIGNES par 17 COL; X0= 0 Y0= 0
525 575 625 675 725 775 825
MAILLAGE RADIAL
-525 -575 -625 -675 -725 -775 -825 HSUBS 1
25

```

Fichier pas de temps

```

EXEMPLE MAILLAGE CYLINDRIQUE 2D --> 1D (DEBIT=2000/2PI = 318.31)
*** Debut de la simulation a la date : 12; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 1: se termine a la date : 13; ***
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1F= 1V=-318.31;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 2: se termine a la date : 18; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 3: se termine a la date : 24; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 4: se termine a la date : 36; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 5: se termine a la date : 60; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 6: se termine a la date : 108; ***
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 7: se termine a la date : 132; ***
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
./***** Fin de ce pas
*** : : Fin de la simulation : ; ***

```

Fig. 4 - Exemple 1 cylindrique : fichiers répertoires, substratum et pas de temps.

```

EXEMPLE MAILLAGE CYLINDRIQUE 2D --> 1D (POMPAGE)
*** Editions et controles souhaitees MARTHE 4.4 ***
0=LISTING DETAILLE DE TOUTES LES OPERATIONS ET RESULTATS
0=CONTROLE SUR CONSOLE DE LA LECTURE DES BLOCS DE DONNEES
0=EDITION DE TOUS LES TABLEAUX DE DONNEES LUS (ET DEDUITS)
0=EDITION DES DONNEES DE MAILLES EN FIN DE CALCUL (-1=Binaire)
0=CONTROLE DE LA CONVERGENCE DANS UNE MAILLE PARTICULIERE
0=NUMERO DE LIGNE DE L'EVENUELLE MAILLE A CONTROLER
0=NUMERO DE COLONNE DE L'EVENUELLE MAILLE A CONTROLER
0=NUMERO DE COUCHE A CONTROLER [0=MAX(LE MAX(DEBIT RESID))]
0=NUMERO DU "DETAIL" DE L'EVENUELLE MAILLE A CONTROLER
0=NOMBRE D'ITERATIONS FINALES A CONTROLER
*** Dimensions et geometrie ***
30=NOMBRE MAXIMAL DE PAS DE MODELE (peut etre > nombre reel)
15=NOMBRE DE PAS DE CALCUL PAR PAS MODELE (VALEUR STANDARD=1)
1=LECTURE DE COTES TOPOGRAPHIQUES (TOIT SUPERIEUR)
*** Controle de la Resolution ***
20=NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS PAR PAS DE CALCUL (TRANSITOIRE)
0=NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS POUR INITIALISATION PERMANENT
5-5=MAXIMUM DE LA VARIATION MOYENNE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
1=COEFF. DE RELAXATION DES CALCULS (1=NORMAL >1 =SUR <1=SOUS)
0=[PARAMETRE SUPPLEMENTAIRE PREVU ... POUR CONVERGENCE]
1-2=RAPPORT = (EPAIS. MINI DENOYAGE) / (EPAIS. MOYENNE COUCHE)
2=MODE RESOLUTION [0=MAILL 1=/BANDES 2=DIRECT/CHOLES 3=POLYN]
0=NOMBRE D'ITERATIONS INTERNES SI RESOLUTION DIRECTE [DEF=10]
0=TYPE DE RESOL DIRECTE [0=GLOBAL 1=/COUCHES]
*** Unites des donnees ***
1-4=UNITE DES PERMEABILITES DES AQUIF EN M/S
2.7777-4=UNITE DES DEBITS EN M3/S
1=UNITE DES CHARGES EN M
1-4=UNITE DES EMMAGASINEMENTS CAPTIFS EN [-] ou 1/M (0 = PERMA)
1-2=UNITE DES EMMAGASINEMENTS LIBRES EN [-] (0 = PERMA)
1=UNITE DES HAUTEURS D'INFILTRATION EN MM
1=UNITE DES HAUTEURS D'IRRIGATION EN MM
SEC=DUREE DE REFERENCE HAUTEURS INFILT (SEC,MIN,HEU,JOI,MOI,ANN)
HEU=UNITE DE TEMPS (PAS DE MODELE) (SEC,MIN,HEU,JOI,MOI,ANN)
1=UNITE DES COORDONNEES DES MAILLES EN M
1=COEFFICIENT D'ANISOTROPIE VERTICALE KV/KH PERMEABILITES
1=COEFFICIENT D'ANISOTROPIE HORIZONTALE KX/KY PERMEABILITES
1=EMMAGASIN. CAPTIF LUS (1=SPECIF. 0=TOUTES CHES -1=PAR COU)
*** Point origine des donnees ***
0=REFERENCE DES CHARGES (CHARGES MODELE=CHARGES LU + REF)
0=REFERENCE DU SUBSTRATUM (SUBSTR. MODELE=SUBSTR. LU + REF)
0=EPAISSEUR EVENTUELLE DE LA TRANCHE DE COUPE (DEFAULT=0)
*** Description des couches aquiferes ***
COU= 1;EPAIS= 50;EPON SUP =0;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0
*** Mailles a Historiques ***
/CHARG/HISTO C= 15L= 1P= 1;C= 10L= 1P= 1;C= 12L= 1P= 1;C= 1L= 1P= 1;
/DEBIT/HISTO C= 15L= 1P= 1;C= 10L= 1P= 1;C= 12L= 1P= 1;C= 1L= 1P= 1;
*** Options supplementaires (3) (pour accessoires) ***
0=[Option supplementaire 1]
0=[Option supplementaire 2]
0=[Option supplementaire 3]
*** Initialisation avant calculs ***
/*****/*****/ Fin d'Initialisation
*** Fin fichier Generalites ***

```

Fig. 5 – Exemple 1 cylindrique : fichier paramètre.

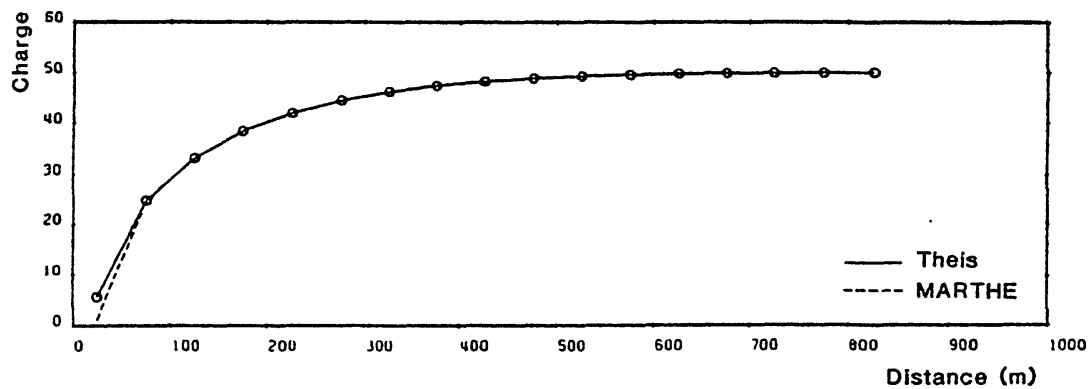


Fig. 6 – Exemple 1 cylindrique : profil de charge après 120 heures de pompage.

Exemple 2

Forage à pénétration partielle (3D). Il s'agit d'un aquifère de 40 mètres d'épaisseur (4000 cm) avec un forage pénétrant de 20 mètres, qui est modélisé par une zone équipotentielle.

Le maillage est formé de 16 lignes de 2,5 mètres de haut et de 18 colonnes de largeurs augmentant régulièrement de 10 cm à 25 mètres. La figure 7 montre le fichier paramètres, la figure 8 le fichier substratum et la figure 9, les charges calculées en régime permanent de 0 à 80 mètres de distance avec visualisation des vitesses.

```

EXEMPLE MAILLAGE CYLINDRIQUE 3D --> 2D (POMPAGE PENETRATION PARTIELLE)
*** Editions et controles souhaitees MARTHE 4.4 ***
0=LISTING DETAILLE DE TOUTES LES OPERATIONS ET RESULTATS
0=CONTROLE SUR CONSOLE DE LA LECTURE DES BLOCS DE DONNEES
1=EDITION DE TOUS LES TABLEAUX DE DONNEES LUS (ET OEDUITS)
0=EDITION DES DONNEES DE MAILLES EN FIN DE CALCUL (-1=Binnaire)
0=CONTROLE DE LA CONVERGENCE DANS UNE MAILLE PARTICULIERE
0=NUMERO DE LIGNE DE L'EVENUELLE MAILLE A CONTROLER
0=NUMERO DE COLONNE DE L'EVENUELLE MAILLE A CONTROLER
0=NUMERO DE COUCHE A CONTROLER [0=MAILLE MAX(DEBIT RESID)]
0=NUMERO DU "DETAIL" DE L'EVENUELLE MAILLE A CONTROLER
0=NOMBRE D'ITERATIONS FINALES A CONTROLER
*** Dimensions et geometrie ***
0=NOMBRE MAXIMAL DE PAS DE MODELE (peut etre > nombre reel)
1=NOMBRE DE PAS DE CALCUL PAR PAS MODELE (VALEUR STANDARD=1)
1=LECTURE DE COTES TOPOGRAPHIQUES (TOIT SUPERIEUR)
*** Controle de la Resolution ***
0=NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS PAR PAS DE CALCUL (TRANSITOIRE)
80=NOMBRE MAXIMAL D'ITERATIONS POUR INITIALISATION PERMANENT
5-5=MAXIMUM DE LA VARIATION MOYENNE DE CHARGE ENTRE 2 ITERATIONS
1.6=COEFF. DE RELAXATION DES CALCULS (1=NORMAL >1 =SUR <1=SOUS)
0=[PARAMETRE SUPPLEMENTAIRE PREVU ... POUR CONVERGENCE]
1-2=RAPPORT = (EPAIS. MINI DENOYAGE) / (EPAIS. MOYENNE COUCHE)
2=MODE RESOLUTION [0=MAILL 1=/BANDES 2=DIRECT/CHOLES 3=POLYNI]
0=NOMBRE D'ITERATIONS INTERNES SI RESOLUTION DIRECTE [DEF=10]
0=TYPE DE RESOL DIRECTE [0=GLOBAL 1=/COUCHES]
*** Unites des donnees ***
1-4=UNITE DES PERMEABILITES DES AQUIF EN M/S
2.7777-7=UNITE DES DEBITS EN M3/S
1-2=UNITE DES CHARGES EN M
0=UNITE DES EMMAGASINEMENTS CAPTIFS EN [-] ou 1/M (0 = PERMA)
0=UNITE DES EMMAGASINEMENTS LIBRES EN [-] (0 = PERMA)
1=UNITE DES HAUTEURS D'INFILTRATION EN MM
1=UNITE DES HAUTEURS D'IRRIGATION EN MM
SEC=DUREE DE REFERENCE HAUTEURS INFILT (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
HEU=UNITE DE TEMPS (PAS DE MODELE) (SEC,MIN,HEU,JOU,MOI,ANN)
1-2=UNITE DES COORDONNEES DES MAILLES EN M
1=COEFFICIENT D'ANISOTROPIE VERTICALE KV/KH PERMEABILITES
1=COEFFICIENT D'ANISOTROPIE HORIZONTALE KX/KY PERMEABILITES
1=EMMAGASIN. CAPTIF LUS (1=SPECIF. 0=TOUTES CHES -1=PAR COU)
*** Point origine des donnees ***
0=REFERENCE DES CHARGES (CHARGES MODELE=CHARGES LU + REF)
0=REFERENCE DU SUBSTRATUM (SUBSTR. MODELE=SUBSTR. LU + REF)
0=EPAISSEUR EVENTUELLE DE LA TRANCHE DE COUPE (DEFAUT=0)
*** Description des couches aquiferes ***
COU= 1;EPAIS= 1000;EPON SUP =0;EMMAG EPON= 0;UNI KE= 1;ANISOT= 0
*** Mailles a Historiques ***
/CHARG/HISTO C= 15L= 1P= 1;C= 10L= 1P= 1;C= 12L= 1P= 1;C= 1L= 1P= 1;
/DEBIT/HISTO C= 15L= 1P= 1;C= 10L= 1P= 1;C= 12L= 1P= 1;C= 1L= 1P= 1;
*** Options supplementaires (3) (pour accessoires) ***
0=[Option supplementaire 1]
0=[Option supplementaire 2]
0=[Option supplementaire 3]
*** Initialisation avant calculs ***
/EQUIP/MAILL C= 1L= 1P= 1V= 1;C= 1L= 2P= 1V= 1;
/EQUIP/MAILL C= 1L= 3P= 1V= 1;C= 1L= 4P= 1V= 1;
/EQUIP/MAILL C= 1L= 5P= 1V= 1;C= 1L= 6P= 1V= 1;
/EQUIP/MAILL C= 1L= 7P= 1V= 1;C= 1L= 8P= 1V= 1;
/DEBIT/MAILL C= 1L= 1P= 1V=-318.31;
/DEBIT/MAILL C= 18L=999P= 1V= 9999;
/CHARG/EDITI I= 2
/DEBIT/EDITI *= 3;V= 0;L= 0
/***** Fin d'Initialisation
*** Fin fichier Generalites ***

```

Fig. 7 – Exemple 2 cylindre 3D ® 2D : fichier paramètre.

PANNEAU no 1 / 2 d'un SEMIS de	16 LIGNES par	18 COL; X0=	0 Y0=	0
5 15 25 40 62.5 87.5 125 175 250			400	
MAILLAGE RADIAL 2 D			HSUBS 1	
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	3875
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	3625
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	3375
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	3125
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	2875
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	2625
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	2375
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	2125
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	1875
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	1625
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	1375
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	1125
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	875
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	625
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	375
-5 -15 -25 -40 -62.5 -87.5 -125 -175 -250			-400	125
PANNEAU no 2 / 2 d'un SEMIS de	16 LIGNES par	18 COL; X0=	0 Y0=	0
625 875 1250 1750 2500 4000 6250 8750				
MAILLAGE RADIAL 2 D			HSUBS 1	
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				3875
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				3625
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				3375
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				3125
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				2875
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				2625
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				2375
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				2125
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				1875
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				1625
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				1375
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				1125
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				875
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				625
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				375
-625 -875 -1250 -1750 -2500 -4000 -6250 -8750				125

Fig. 8 – Exemple 2 cylindrique 3D ® 2D : fichier substratum.

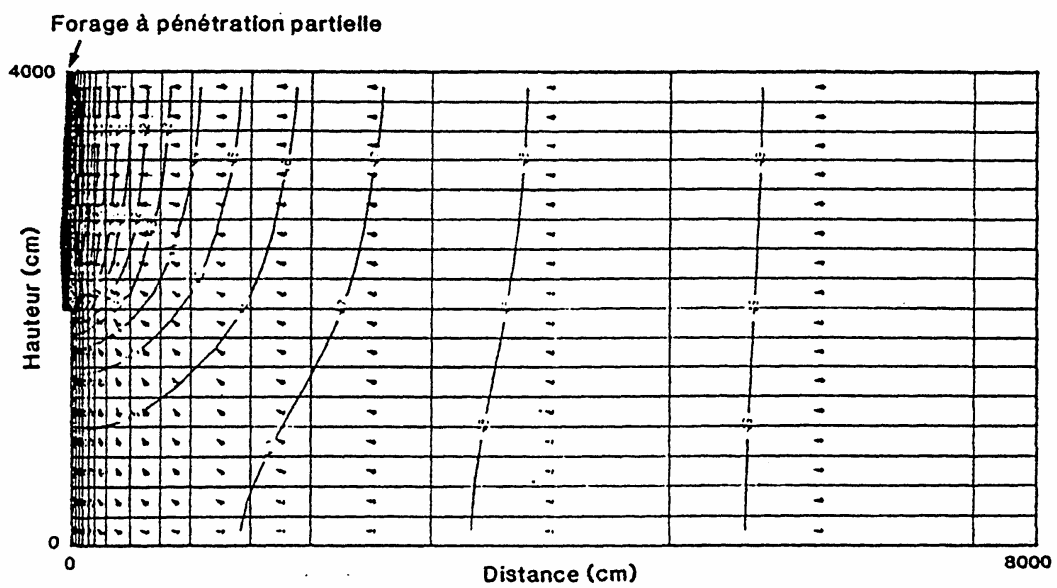


Fig. 9 – Exemple 2 : forage à pénétration partielle : isovaleurs de charges (et vitesses).